

유공판의 좌굴강도에 관한 연구

김을년^{†*}, 최의흥^{*}, 권진철^{**}, 백점기^{***}

현대중공업 기술개발본부 구조연구실^{*}
현대중공업 조선사업본부 구조설계부^{**}
부산대학교 조선해양공학과^{***}

A Study on the Buckling Strength of Plate Panels with Opening

Ui Nyeon Kim^{†*}, Ick Heung Choe^{*}, Jin Chil Kwon^{**} and Jeom Kee Paik^{***}

Structure Research Dep't, Hyundai Heavy Industries Co., LTD^{*}
Hull Initial Design Dep't, Hyundai Heavy Industries Co., LTD^{**}
Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.^{***}

Abstract

The aim of the present study is to investigate the buckling strength of plates and stiffened panels with opening under transverse thrust and shear actions. It is observed that the existing design formulation for critical-buckling strength of plates are not valid for perforated plates, because the current design formulation trends can significantly overestimate or underestimate the load-carrying capacity of plates when plates have large opening and/or are thick. A series of eigen value and elastic-plastic large deflection finite element analyses are carried out with varying the aspect ratio of plate, the opening size and location on plate until and after the ultimate strength is reached. Based on the results obtained from the present study, closed-form design formulations for the elastic buckling strength of plates and stiffened panels with opening are derived. The derived design formulations are considered plasticity correction of the material and verified by experimental tests and results of nonlinear finite element computations.

※ Keywords: Buckling strength(좌굴강도), Perforated plate(유공판), Perforated stiffened panel(유공보강판), Design formula(설계식), Ship structure(선체)

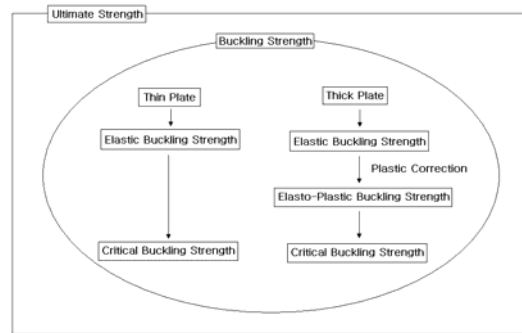
1. 서론

선체구조에는 수많은 유공판들이 각종 용도로 설치되며 이들에 대한 좌굴강도 평가는 선체설계의 주요한 업무 중 하나이다. 그러나 유공판에 대한 기존의 좌굴강도 설계식을 사용할 때 다음과 같은 문제점들이 있다.

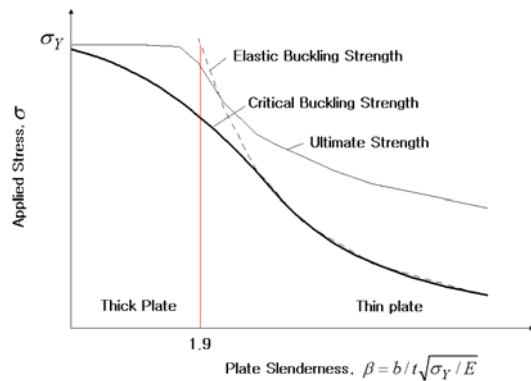
- 큰 구멍을 갖는 얇은 두께의 유공판에 대하여 선급의 설계식으로 좌굴강도를 계산하면 선급들 간에 큰 차이를 나타내는 경우가 있어 강도 평가상의 신뢰성에 문제가 발생하고 있다.
- 선급식들은 탄성 좌굴강도를 소성 수정하여 탄소성 또는 소성영역의 좌굴강도를 평가하도록 되어 있다 그러나 기존의 소성수정식이 무공판에 대하여 개발되어 있어 구멍이 크거나 후판인 경우 실제 좌굴강도 보다 과대 평가하는 경향을 나타내고 있다.
- 또한 기존의 유공판 관련 연구들은 대부분 단위 유공판 부재에 관련한 것들이다. 그러나 유공판에 인접한 이웃 판부재가 무공판일 경우, 이웃한 무공판의 면내강성이 좌굴강도에 기여하여 유공판의 좌굴강도가 상승하는 것으로 알려져 있어 유공보강판에 대한 연구도 필요하다.

한편, 최근 IACS 와 ISO 에서는 항복응력, 처짐 등을 기준으로 한 SLS(Serviceability Limit States) 설계기준을 보다 합리적인 것으로 알려진 최종강도(ULS, Ultimate Limit States) 설계기준으로 변경하고 있다(IACS 2006a, 2006b, ISO 2007, 2008). 그러나 구조강도를 안전측에서 평가하려는 경향으로 선급과 일반 산업규격에서는 박판은 탄성 좌굴강도로, 후판은 최종강도와 동일한 또는 이보다 낮은 탄소성 또는 소성좌굴을 기준으로 설계하고 있으며 보수적 관점에서 여전히 유효하다. 특히 초기처짐이 크고 박판인 경우, 좌굴발생으로 과도한 변형이 생기면 SLS 설계기준을 만족하지 못할 뿐 아니라 급격한 강성저하로 인접부재에까지 연속적인 파손을 야기시킬 수 있다. Fig. 1(a)는 선급 또는 일반 산업규격에서 채택하고 있는 판부재에 대한 좌굴강도 계산 과정을 나타낸 것이다. 박판

의 경우, 탄성 좌굴강도를 임계 좌굴응력으로 직접 사용가능하나 후판의 경우, 탄성 좌굴강도를 Johnson-Ostenfeld 소성수정식으로 탄소성 좌굴강도를 구하여 이를 임계 좌굴응력으로 취급한다. Fig. 1(b)는 무공판에 대한 좌굴강도와 최종강도를 세장비의 함수로 나타낸 것으로 일반적으로 좌굴강도는 최종강도보다 안전측에서 나타난다.



(a) Analytical calculation of buckling strength



(b) Curves between strength and slenderness ratio

Fig. 1 Buckling and ultimate strength of steel plates without opening

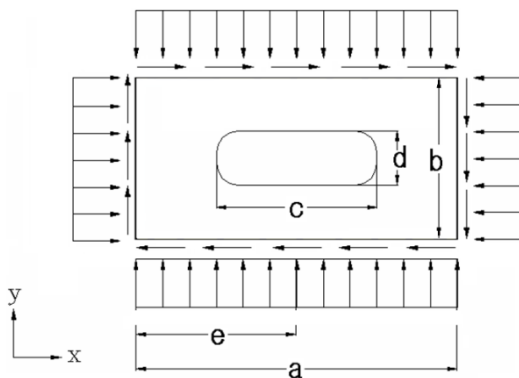
Kim et al.(2008, 2009)은 판의 길이방향으로 압축력이 작용하는 경우에 대하여 90 개의 유공판과 8 개의 유공보강판에 대한 실험을 수행하였으며 유한요소법에 의한 구조해석 수행결과로부터 새로운 좌굴설계식을 제시하였다. Paik(2007)는 유공판

에 대한 최종강도 설계식을 제시하였으며 Harada and Fujikubo(2001 and 2002)는 유공판과 유공보강판에 대한 좌굴강도와 최종강도 연구를 수행한 바 있다.

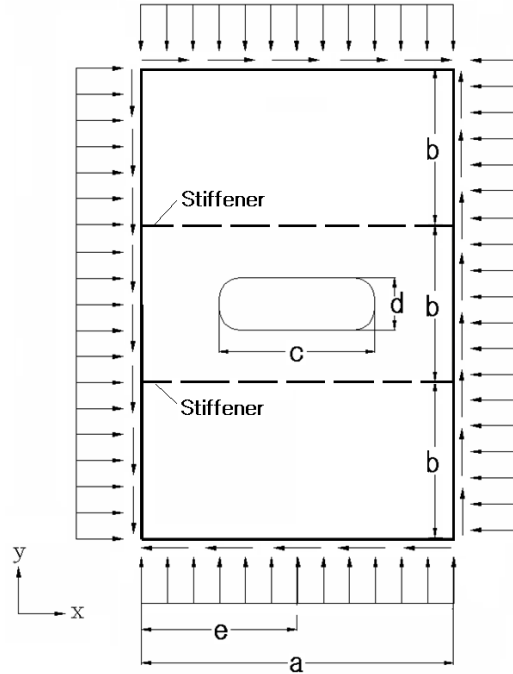
본 연구에서는 선박의 유공판 좌굴거동을 잘 표현할 수 있는 정확하고 편리한 설계식을 개발하고자 판의 종횡비, 세장비, 구멍의 형상과 크기, 위치 등을 설계변수로 유한요소법에 의한 탄성좌굴 및 탄소성 비선형 해석을 수행하였다. 이로부터 탄성 및 탄소성 영역에서 사용할 수 있는 좌굴강도 설계식을 개발하였으며 이를 실선에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

1.1 유한요소해석

Fig. 2는 조합하중을 받는 유공판과 유공보강판을 나타낸 것이다. 판의 길이는 a , 판의 두께는 t , 판의 폭은 b 로 각각 정의하고 구멍의 형상은 원형(Circular) 또는 맨홀(Manhole or stadium)형상을 고려하였다. 판의 길이방향 구멍의 직경을 c , 판의 폭방향 구멍의 직경을 d , 판의 한쪽 끝단에서 구멍의 중심까지의 거리를 e 로 표시한다. 탄소성 비선형 해석에서 사용한 재료의 기계적 특성치로 탄성계수 E 는 206GPa 항복응력 σ_y 는 290MPa 그리고 프와송비는 ν 는 0.3을 사용하였다. 또한 재료는 완전 탄소성 거동(Elastic-perfectly plastic behavior)한다는 보수적 가정으로 해석하였다.



(a) Plate with opening



(b) Stiffened panel with opening

Fig. 2 Loading and boundary conditions

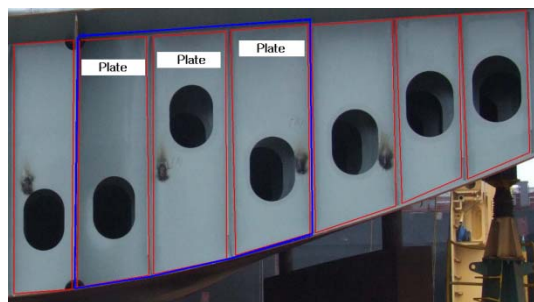
1.2 유공판의 특성치 조사

탄성좌굴 및 탄소성 비선형 해석에 사용할 유공판의 형상 및 특성치를 실선선 22 척(컨테이너선, LNG 선, LPG 선, 탱커선)을 대상으로 조사하였다. 이에 의하면 판의 세장비 ($\beta = b/t\sqrt{\sigma_y/E}$)는 1.55~3.83으로 선체구조에는 박판과 후판이 모두 사용되며 판의 종횡비(a/b)는 1.8~6.55, 구멍의 종횡비(c/d)는 0.67~2.0 범위에 있다. 또한 유공의 길이와 판의 길이 비(c/a)는 0.161~0.438, 유공의 폭과 판의 폭 비(d/b)는 0.45~0.81로 각각 나타났다. 구멍의 설치위치는 판의 종횡비(a/b)가 비교적 작은 경우에는 중앙부($e/a=0.5$)에 있으며 종횡비가 큰 경우에는 사람이 구멍으로 출입할 때 편의성을 제공하기 위하여 판의 한쪽 단부에서 600mm 정도 떨어져 설치한다. 이중선축 높이가 높은 선박의 경우, 선박건조시 사용하는 작업용 맨홀과 건조 후 검사용 맨홀을 별도로 설치하고 있다. 작업용 맨홀은 구조강도상 취

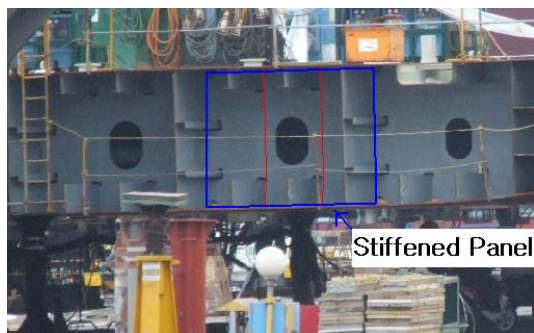
약하다고 판단될 때 건조 후 용접으로 덧판을 붙여 구멍부위를 없애기도 한다. 일반적으로 전단응력이 크게 나타나는 호퍼코너 부근의 연결부 또는 종격벽(Longitudinal bulkhead)과 만나는 선저부의 플로어(Floor)에는 구멍(Opening or cutout)의 설치를 피하고 있으며 구조강도상 안전하다고 판단되는 곳에는 중량경감용 구멍을 연속적으로 시공하는 경우도 있다.

SOLAS 규정은 폭발 위험성이 있는 선박들(Tanker, Gas 운반선, 정유운반선 등)의 맨홀(검사용과 비상탈출(Escape)용 구멍) 크기는 600mmx800mm 로 되어야 한다고 규정하고 있다. 컨테이너선과 같은 일반선박의 맨홀 크기는 500x700mm 이며 응력의 크기나 주위 구조 형상에 따라 400x600mm 구멍을 설치하기도 한다.

Fig. 3 은 유공판이 설치되어 있는 선체블록 사진이다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 보강재로 구분된 단위 판부재마다 구멍을 갖는



(a) Perforated plate



(b) Perforated stiffened panel

Fig. 3 Plates and stiffened panels with opening at ship structure blocks

경우 개개의 유공판 좌굴강도는 3 개이상의 유공판들로 이뤄진 유공보강판의 좌굴강도와 동일할 것으로 판단된다. 따라서 유공판들이 인접하여 연속적으로 설치된 경우, 유공판만으로 좌굴강도를 평가할 수 있다. Fig. 3(b)와 같이 중앙에 유공판이 있고 그 양측에 2 개의 무공판들로 된 유공보강판의 좌굴강도는 유공판 양측에 있는 무공판이 판의 폭방향 면내강성을 증가시켜 유공판의 좌굴강도보다 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 본 연구에서는 유공판과 유공보강판을 분리하여 사용하기로 한다.

1.3 기존설계식들의 문제점

Fig. 4 는 판의 길이방향으로 압축력을 받을 때 선급식과 유한요소법에 의한 좌굴계수를 비교한 것이다. 이 경우 영국선급(LR 1978)이 비교적 FEA 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 노르웨이(DnV 2008) 선급의 경우, 구멍이 큰 경우 탄성 좌굴강도를 과소평가하는 것으로 나타났다. 영국선급과 노르웨이선급의 탄성 좌굴계수를 구하는 식은 구멍 크기의 함수로만 되어 있어 판의 중횡비의 영향을 고려할 수 없어 탄성 좌굴강도를 실제강도와 다르게 평가하고 있는 경우도 있다.

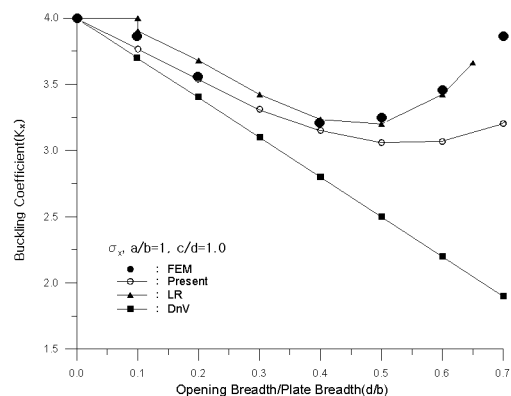


Fig. 4 Comprison of buckling coefficient, K_x under longitudinal thrust obtained by various solutions($a/b=1, c/d=1.0$)

Fig. 5 는 전단력이 작용할 때 선급식과 유한요소법에 의한 좌굴계수를 비교한 것이다. 노르웨이

선급은 탄성 좌굴강도를 과대 평가하는 것으로 나타났다. 따라서 유공판의 기하학적 특성치를 고려한 보다 정확한 탄성 좌굴강도 설계식 개발이 요구된다.

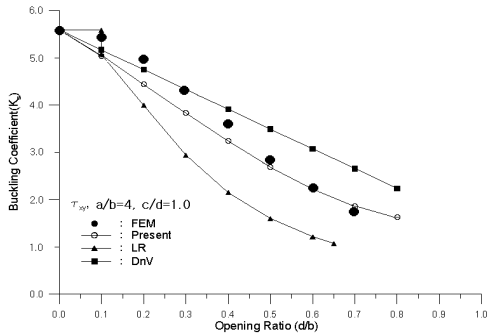


Fig. 5 Comprison of buckling coefficient, K_s under shear action obtained by various solutions ($a/b=4, c/d=1.0$)

한편, 선급에서는 탄성좌굴이 아닌 비탄성좌굴의 경우 전통적으로 Johnson-Ostenfeld 가 제안한 소성수정식을 사용하여 임계좌굴응력 (σ_{cr})을 구하고 있으며 식(1)과 같다.

Johnson-Ostenfeld 식

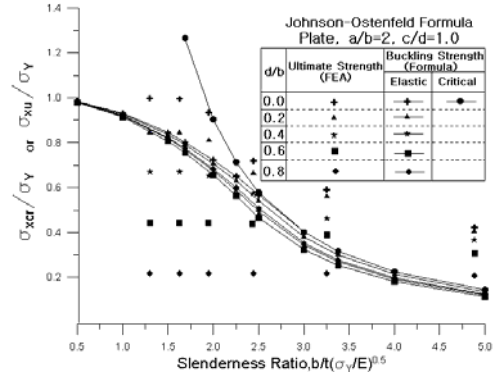
$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y} = 1 - \frac{\lambda^2}{4} \quad \lambda \leq \sqrt{2}$$

$$= \frac{1}{\lambda^2} \quad \lambda \geq \sqrt{2} \quad (1)$$

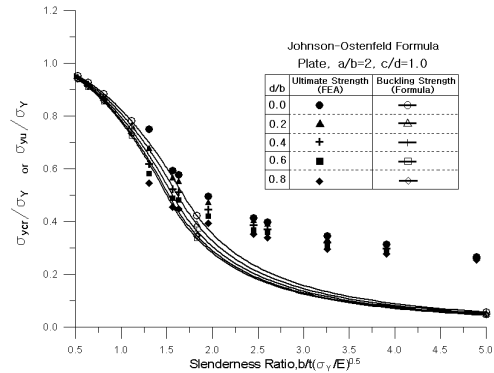
여기서, $\lambda = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_E}}$, σ_E 은 탄성 좌굴응력이다.

Fig. 6 은 식(1)로 계산한 임계 좌굴강도와 유한요소법에 의한 최종강도를 비교한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 판의 두께가 두껍고 구멍이 큰 유공판의 경우, 임계 좌굴강도가 최종강도보다 큰 값을 나타내고 있어 실제강도 보다 과대평가하는 것을 알 수 있다.

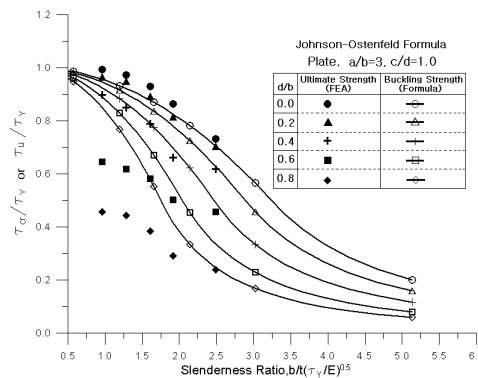
Fig. 7 은 유공판과 유공보강판에 대하여 유한요소법으로 구한 최종강도를 비교한 것으로 유공보강판이 유공판보다 큰 값을 나타내며 구멍의 크기 증가에 따른 최종강도 저하현상은 유공판이 유공보강판보다 크게 나타난다.



(a) Under longitudinal axial compression

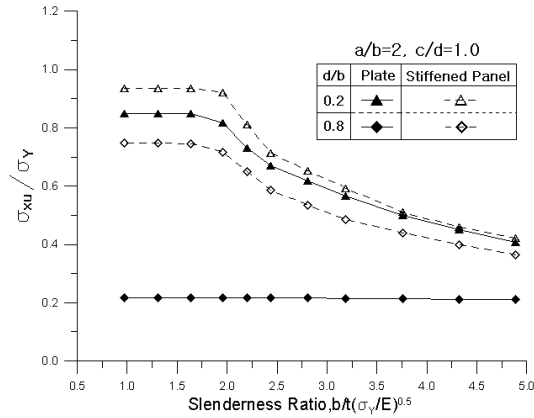


(b) Under transverse axial compression

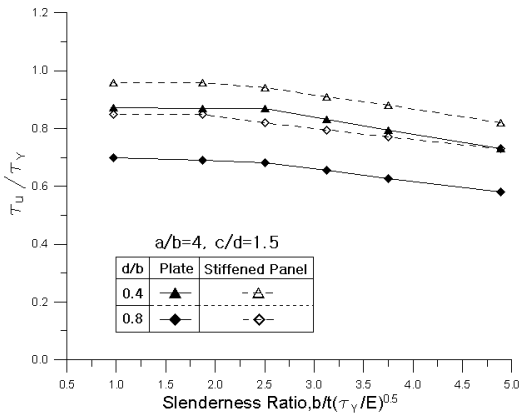


(c) Under shear action

Fig. 6 Critical buckling strength of plates evaluated by Johnson-Ostenfeld Formula



(a) Under longitudinal axial compression



(b) Under shear action

Fig. 7 Ultimate strength of the plates and stiffened panels obtained from non-linear FEA

따라서 이상에서 제기한 문제점들을 해결하는 새로운 형태의 유공판과 유공보강판 좌굴설계식 개발이 필요하다.

2. 설계식의 도출과 적합성 검토

2.1 새로운 설계식 도출

1장에서 정의한 유공판의 특성치로 유한요소법에 의한 고유치해석, 탄소성 비선형해석을 수행하고 이로부터 새로운 형태의 유공판과 유공보강판의 좌굴강도 설계식을 제안한다.

판의 길이방향으로 압축력 작용시

판의 길이방향으로 압축력이 작용할 때, 이론적 탄성 좌굴응력 σ_{xE} 는 식(2)와 같다.

$$\sigma_{xE} = K_x \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, K_x 는 좌굴계수로서 경계조건, 하중조건, 유공의 크기와 형상, 위치 등의 영향을 받는다. K_x 는 유공판에 대한 시리즈 고유치 해석으로부터 Kim et al.(2005, 2008)는 식(3)과 같이 유도하였다.

$$K_x = K_{x0} \gamma_x \quad (3)$$

여기서, K_{x0} 는 무공판의 좌굴계수로 4 이고 $\gamma_x = 1 - \varphi_x [A + B(d/b) + C(d/b)^2 + D(d/b)^3] \frac{d}{b}$ 이며 이에 대한 계수 A, B, C, D는 Table 1로 정의한다. 유공판의 $\varphi_x = 1$ 이고 유공보강판의 $\varphi_x = 0.33$ 이다.

Table 1 Coefficient of γ_x

Aspect ratio	Coefficient			
	A	B	C	D
$1 \leq a/b < 2$	0.33	1.88	-4.40	2.31
$2 \leq a/b$	-0.06	2.40	-4.00	1.76

기존의 소성수정식 식(1)의 문제점을 보완하기 위하여 Kim et. Al(2008)은 새로운 소성수정식 식(4)을 제안하였다.

$$\sigma_{xcr} = \begin{cases} \sigma_{xE} & \text{for } \beta > 2.5 \frac{d}{b} \varphi_x + 2.5 \\ \text{Min}[\sigma_{xc}, \sigma_{xE}] & \text{for } \beta \leq 2.5 \frac{d}{b} \varphi_x + 2.5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \sigma_{xc} = \sigma_y \left(1 - \frac{\sigma_y}{\omega_x \sigma_{xE}}\right) \left(1 - \varphi_x \frac{d}{b}\right)$$

$$\omega_x = 10 \left(\frac{d}{b}\right) + 4 \quad \text{for } d/b \leq 0.6$$

$$\omega_x = 80\left(\frac{d}{b}\right) - 38 \quad \text{--- for } d/b > 0.6$$

$$\varphi_x = \text{as defined in Eq.(3)}$$

$$\sigma_{xE} = \text{as defined in Eq.(2)}$$

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}$$

판의 폭방향으로 압축력 작용시

한편, 판의 폭방향(y 축 방향)으로 압축응력이 작용할 때 이론적 탄성 좌굴응력 σ_{yE} 는 식(5)와 같다.

$$\sigma_{yE} = K_y \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

유공판의 탄성 좌굴계수 K_y 는 무공판의 탄성 좌굴계수 K_{y0} 에 유공으로 인한 감소계수 γ_y 를 곱하여 식(6)으로 나타낸다.

$$K_y = K_{y0} \cdot \gamma_y \quad (6)$$

여기서, K_{y0} 는 $[1+(b/a)^2]^2$ 이고 $\gamma_y = 1 - \varphi_y [A + B(d/b) + C(d/b)^2] \cdot \frac{d}{b}$ 이다. 유공판의 $\varphi_y = 1$ 이고 유공보강판의 $\varphi_y = 0.8$ 이며 γ_y 의 계수 A, B, C 는 Table 2 로 정의한다.

Table 2 Coefficient of γ_y

Aspect ratio	Coefficient		
	A	B	C
$1 \leq a/b < 2$	0.78	-0.71	0.09
$a/b \geq 2$	0.42	-0.18	-0.03

판의 폭방향으로 압축력이 작용할 때 소성수정식으로 식(7)을 제안한다.

$$\sigma_{ycr} = \sigma_Y \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\omega_y \sigma_{yE}} \left(1 - \frac{c}{a} \right) \right) \left(1 - \frac{c}{a} \right) \quad (7)$$

----- for $\sigma_{yE} > 0.5\sigma_Y \left(1 - \frac{c}{a} \right)$

$$= \sigma_{yE} \quad \text{--- for } \sigma_{yE} \leq 0.5\sigma_Y \left(1 - \frac{c}{a} \right)$$

여기서, 유공판에 대하여 $\omega_y = 4$ 이고 유공보강판에 대하여 $\omega_y = 6.5 \frac{d}{b} + 6$ 이다.

전단력 작용시

유공판에 전단력이 작용할 때 이론적 탄성 좌굴응력 τ_E 는 식(8)과 같다.

$$\tau_E = K_s \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (8)$$

유공판의 탄성 좌굴계수 K_s 는 무공판의 탄성 좌굴계수 $K_{s0} = 5.34 + 4(b/a)^2$ 에 유공으로 인한 감소계수 γ_s 를 곱하여 식(9)로 나타낸다.

$$K_s = K_{s0} \cdot \gamma_s \quad (9)$$

여기서, 구멍의 형상이 원형일 때 즉, $c/d=1.0$ 이면 $\gamma_s = 1 - \varphi_s [A + B(d/b) + C(d/b)^2] \cdot \frac{d}{b}$ 이고 맨홀형 구멍이면 즉, $c/d \neq 1.0$ 이면 $\gamma_s = 1 - \varphi_s [A + B(d/b) + C(d/b)^2] \cdot \frac{c}{a}$ 이다. γ_s 의 계수 A, B, C 는 Table 3 으로 정의하고 유공판의 $\varphi_s = 1$ 이고 유공보강판의 $\varphi_s = 0.33$ 이다.

Table 3 Coefficient of γ_s

Aspect ratio	Coefficient		
	A	B	C
$1 \leq a/b \leq 1.4$	1.33	0.82	-1.51
$1.4 < a/b$	0.92	0.70	-0.93

전단력이 작용할 때 소성수정식은 식(10)으로 제안한다.

$$\tau_{cr} = \tau_Y \left(1 - \frac{\tau_Y}{\omega_s \tau_E} \right) \left(1 - \varphi_s \xi_s \eta_s \right), \quad \tau_E \text{ 중 작은 값}$$

----- $\beta_1 \leq 3.3$ (10)

$$= \tau_E \text{-----} \beta_1 > 3.3$$

여기서, ω_s , ξ_s , η_s 는 Table 4 와 같으며

$$\beta_1 = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_Y}{E}}, \tau_Y = \sigma_Y / \sqrt{3} \text{ 이다.}$$

Table 4 Coefficient of ω_s , ξ_s , η_s

Hole shape	ω_s	ξ_s	η_s
Circular (c/d=1.0)	$16\eta_s + 11$	1	$\frac{d}{b}$
Manhole (c/d≠1)	$8\eta_s + 11$	$0.63 - 0.07 \frac{a}{b}$	$\frac{d}{b} + \frac{c}{a}$

2.2 단독하중 작용시 설계식의 적합성 검토

본 연구에서 개발한 설계식의 적합성을 검토하기 위하여 식(4), (7), (10)에 의한 계산 결과를 비선형 유한요소해석 또는 실험에 의한 최종강도와 비교하였다. 판의 세장비, 구멍의 크기, 구멍의 형상, 판의 종횡비 등의 함수로 좌굴강도를 검토하였으며 Fig. 8~10 은 판의 길이방향으로 압축력 작용시, Fig. 11~14 는 판의 폭방향으로 압축력 작용시, Fig. 15~17 은 전단력이 작용하는 경우이다. 본 연구에서 개발한 설계식에 의한 임계좌굴 응력 값은 실험 또는 비선형 구조해석에 의한 최종강도보다 작은 값으로 안전측에서 평가하는 것으로 나타났다. 특히, 세장비(β 또는 β_1)가 큰 박판인 경우, 최종강도(2 차 좌굴)와 큰 차이를 나타내며 그 이유는 본 연구에서는 좌굴현상이 탄성영역에서 발생하면 임계좌굴응력을 탄성 좌굴응력(1 차 좌굴 응력)으로 정의하기 때문이다. 세장비가 작은 후판의 경우, 설계식에 의한 임계좌굴응력값은 최종강도값보다 약간 작은 값을 나타내었다. 선급에서 사용하는 Johnson-Ostenfeld 소성수정식(1)을 이용하여 후판이고 구멍이 큰 판의 임계 좌굴응력을 계산하면 그 값이 최종강도보다 작게 나타나는 현상이 나타나지만 식(4), (7), (10)을 사용하여 계산하면 이런 현상은 완전히 사라졌다.

Fig. 8 과 10 은 판의 길이방향으로 압축력을 받는 경우에 대한 유공판과 유공보강판의 좌굴강도와 최종강도를 비교한 것이다. 유공판에 인접한

무공판의 면내강성이 유공판의 파손을 방해하는데 기여하기 때문에 후판이고 구멍이 큰 경우에 유공보강판의 좌굴강도와 최종강도는 유공판보다 높게 나타났다. 이 현상은 폭방향으로 압축력이 작용하거나 전단력이 작용할 때에도 나타났다.

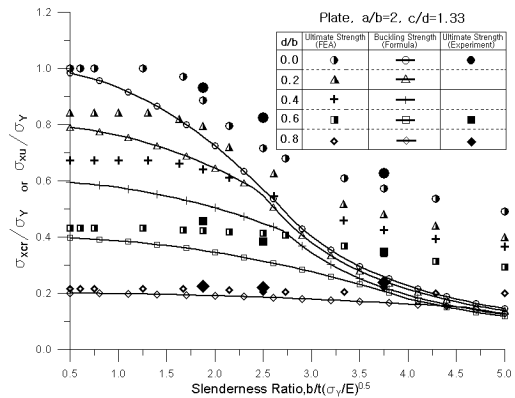


Fig. 8 Variation of the critical buckling stress and ultimate strength of plates under longitudinal thrust with plate slenderness ratio(a/b=2, c/d=1.33)

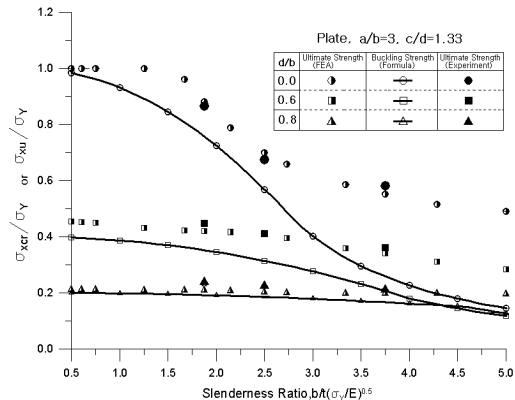


Fig. 9 Variation of the critical buckling stress of plates under longitudinal thrust with plate slenderness ratio(a/b=3, c/d=1.33)

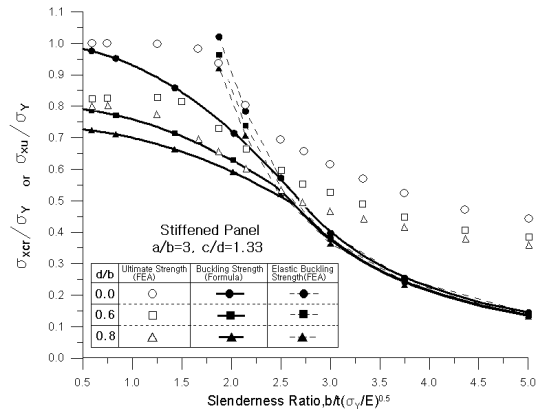


Fig. 10 The Buckling strength and ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust with plate slenderness ratio(a/b=3, c/d=1.33)

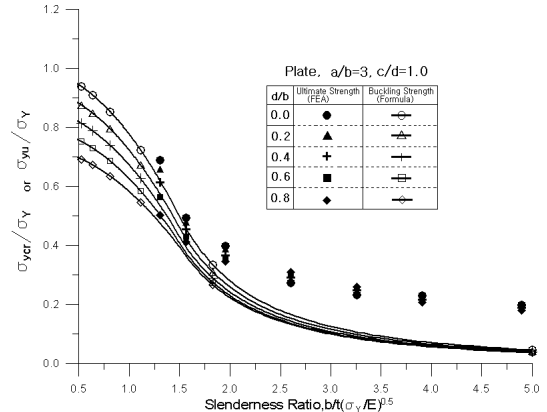


Fig. 12 Variation of the critical buckling stress and ultimate strength of plates under transverse thrust with slenderness ratio(a/b=3, c/d=1.0)

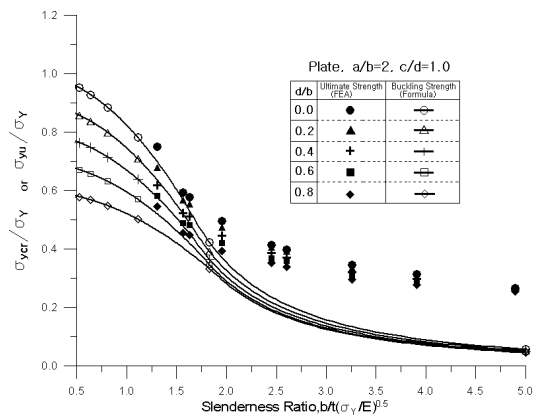


Fig. 11 Variation of the critical buckling stress and ultimate strength of plates under transverse thrust with plate slenderness ratio(a/b=2, c/d=1)

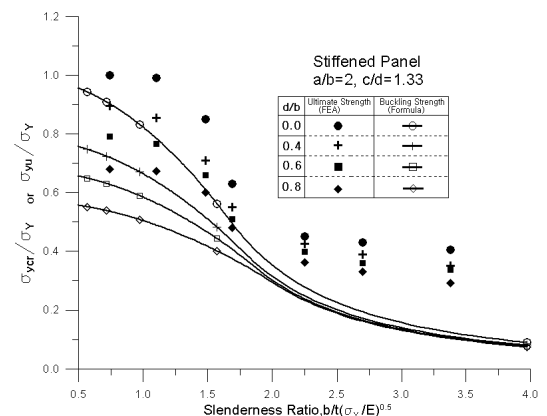


Fig. 13 The Buckling strength and ultimate strength of stiffened panels under transverse thrust with plate slenderness ratio(a/b=2, c/d=1.33)

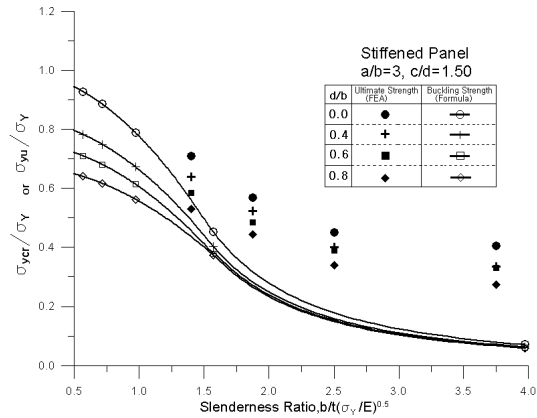


Fig. 14 The buckling strength and ultimate strength of stiffened panels under transverse thrust with plate slenderness ratio(a/b=3, c/d=1.5)

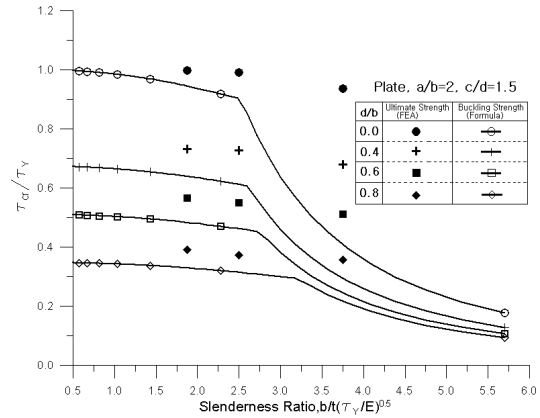


Fig. 16 Variation of the critical buckling stress and ultimate strength of plates under shear action with plate slenderness ratio(a/b=2, c/d=1.5)

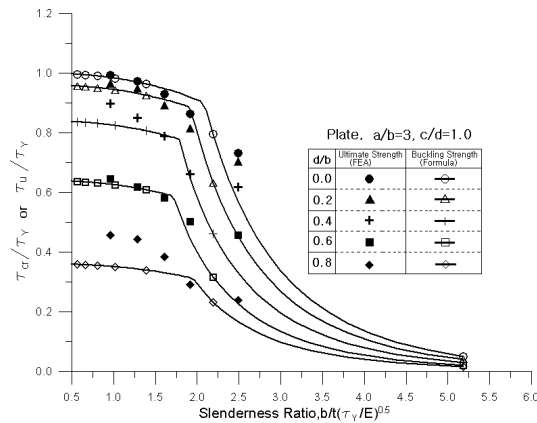


Fig. 15 Variation of the critical buckling stress and ultimate strength of plates under shear action with plate slenderness ratio(a/b=3, c/d=1.0)

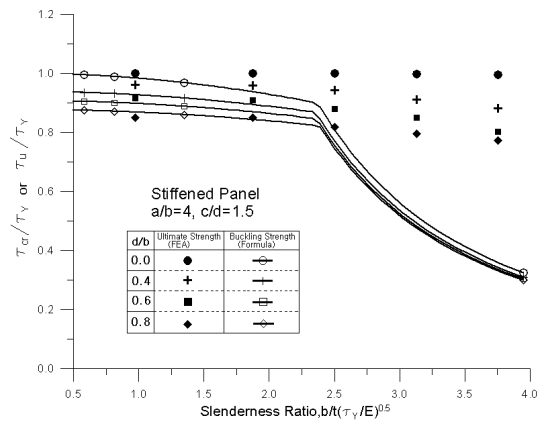
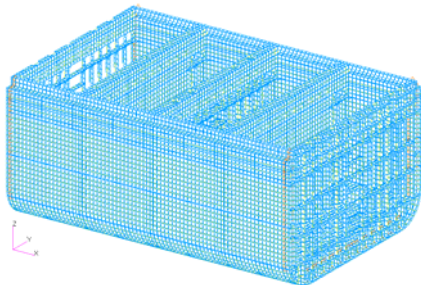


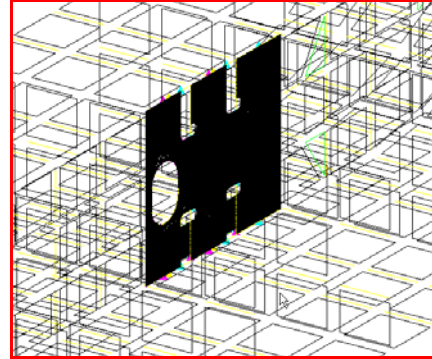
Fig. 17 The buckling strength and ultimate strength of stiffened panels under shear action with plate slenderness ratio(a/b=4, c/d=1.5)

2.3 조합하중 작용시 개발한 설계식의 적합성 검토

개발한 설계식을 실적선에 적용하여 조합하중을 받는 유공판과 유공보강판의 좌굴안전도를 검토하였다. 선체의 유공판부재에 작용하는 하중은 Fig. 18 에 나타난 선체부분 구조모델(Coarse meshed global model)을 이용하여 구하였으며 선체에 가해진 하중은 선급에서 요구하는 종굽힘모멘트, 선체에 작용하는 해수압, 그리고 선적화물에 의한 하중 등이 조합된 것이다. 통상의 유공판 좌굴강도 평가는 종 또는 횡보강재 간격크기의 유한요소(Coarse-mesh)로 구성된 선체부분 구조모델을 이용하여 구조해석을 수행하고 구조강도 평가가 요구되는 유공판 구조물 주위의 변위를 구한 후 상세한 요소로 구성된 부분구조 모델(Fine-meshed local model)의 경계조건으로 평가한다. 적용하중으로 Eigen-value 해석을 수행하여 탄성 좌굴강도를 구하여 소성수정하고 구해진 임계 좌굴응력을 작용응력과 비교하여 안전도를 평가하고 있다. Fig. 19 는 상세한 요소로 구성된 부분구조 해석모델(Fine meshed local model)에 대하여 유한요소법으로 좌굴 고유치 해석을 수행하여 구해진 좌굴 모드를 나타낸 것이다. 또 다른 방법으로는 선체부분 구조해석으로부터 개별 단위 판부재 또는 보강판의 모서리에서 구한 변위를 이용하여 작용 응력을 구하고 이를 2.1 절에서 구한 각각의 임계 좌굴응력을 기초로 좌굴 상관관계 설계식으로 평가하는 방법이다. 따라서 이 방법은 수많은 판부재로 이루어진 선체의 좌굴강도 평가에 소요되는 시간과 노력을 절약할 수 있다.



(a) Coarse meshed global model



(b) Fine meshed local model

Fig. 18 Global and local FE-model

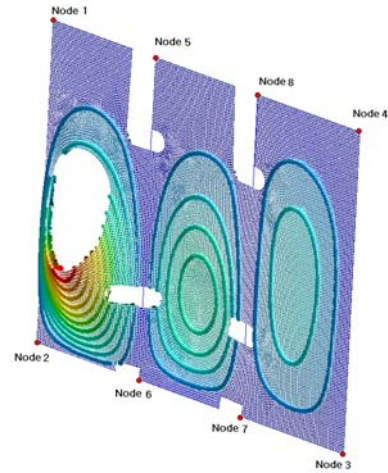


Fig. 19 Buckling mode of stiffened panel with opening obtained from fine mesh eigen-value analysis

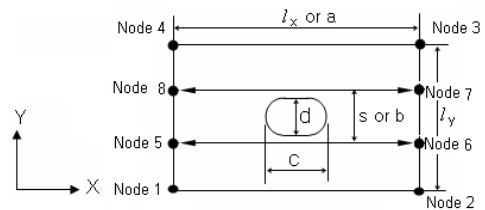


Fig. 20 Node definitions of the perforated plate and stiffened panel

Fig. 20 은 Fig. 18 의 선체부분 구조모델의 해석

으로부터 좌굴강도를 평가하려는 유공보강판의 변위, 즉 Node 1, 2, 3, 4의 변위를 작용응력으로 변환하는 기준 절점을 나타낸 것이다. 2차원 응력과 변형율의 관계식 식(11)로부터 작용응력을 계산한다(Timoshenko and Goodier 1982).

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{(1-\nu^2)}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1-\nu^2)}(\nu\epsilon_x + \epsilon_y) \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{E}{(1+\nu)}\epsilon_{xy} \end{aligned} \quad (11)$$

유공판의 경우, 같은 방법으로 Fig. 20의 Node 5, 6, 7, 8의 변위를 작용응력으로 변환하여 좌굴강도를 평가한다.

2축방향의 압축력과 전단력이 동시에 작용하는 조합하중 상태에서 좌굴 안전계수는 식(12)에 나타낸 바와 같이 등가의 작용응력과 각각의 임계 좌굴응력을 조합한 등가의 임계 좌굴응력의 비로서 나타낼 수 있다.

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Critical Buckling Stress}}{\text{Applied Stress}} \quad (12)$$

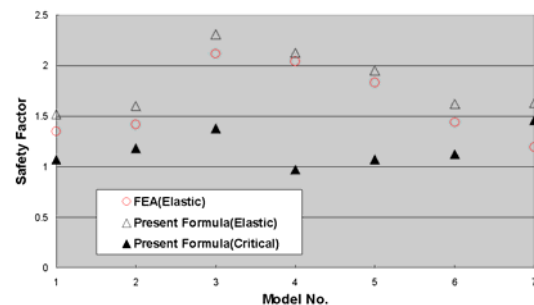
이때 사용한 좌굴 상관관계 설계식은 Paik et al. (1992, 2003)의 식(13)을 사용한다.

$$\left(\frac{\sigma_x}{R_{xx} \cdot \sigma_{xcr}}\right)^{\alpha_1} + \left(\frac{\sigma_y}{R_{yy} \cdot \sigma_{ycr}}\right)^{\alpha_2} = 1 \quad (13)$$

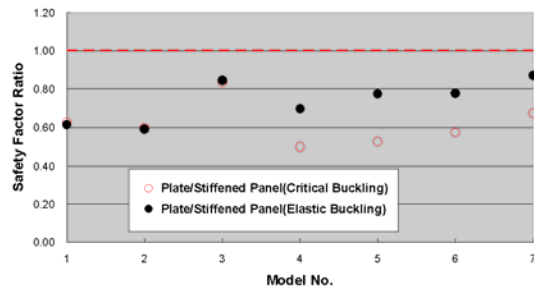
개발한 설계식의 적합성을 확인하기 위하여 실적선의 이중저 늑골(Floor)의 유공보강판에 적용하여 안전계수를 비교하였다.

Table 5는 좌굴계산을 수행하고자 하는 유공보강판의 치수와 선체부분 구조모델의 해석결과부터 얻은 Fig. 19와 20에서 정의한 각 절점(Node)별 변위를 나타낸 것이다. Table 6은 Table 5로부터 식(11)을 사용하여 구한 작용응력과 본 연구에서 개발한 설계식으로 구한 임계 좌굴응력, 식(12)로

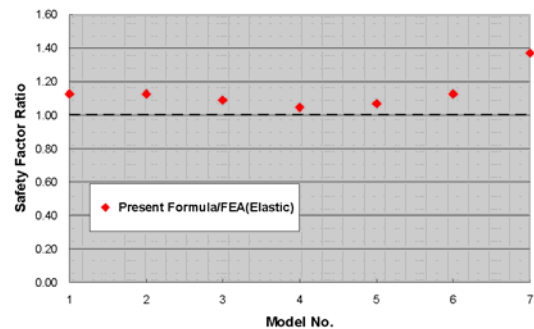
구한 안전계수를 나타낸 것이다. Fig. 21은 Table 6의 결과를 나타낸 것으로 가로축은 Table 5와 6에서 정의한 Model 번호를 세로축은 안전계수 또는 안전계수비로 나타낸 것이다. Fig. 21(a)는 유효요소법에 의한 고유치 해석 결과와 식(12)로 구한 탄성좌굴과 탄소성좌굴 안전계수를 나타낸 것



(a) Safety factor



(b) Plate and stiffened panel by using eq. (12) & (13)



(c) Present formula and FEA

Fig. 21 Comparison of results of present formula and FEA(For Model No, See Table 5 & 6)

Table 5 Plate dimension and displacements obtained from global FEA

Ship Type	Model No.	Plate Dimension, $a \times b \times t \times c \times d$ (mm)	Displacements obtained from global FEA(mm)				
			direction	No. of node			
				1	2	3	4
Container A	1	$2000 \times 840 \times 14 \times 700 \times 500$	x	33.840	33.833	26.644	26.565
			y	-3.334	0.220	0.273	-4.226
	2	$2000 \times 840 \times 14 \times 700 \times 500$	x	43.924	43.968	38.908	38.821
			y	-13.890	-11.842	-11.760	-14.797
Container B	3	$1700 \times 720 \times 10 \times 700 \times 500$	x	167.280	167.240	160.350	160.360
			y	-1.603	1.683	2.215	-2.174
	4	$1700 \times 720 \times 12 \times 700 \times 500$	x	157.750	157.810	149.090	149.220
			y	-2.293	2.302	2.200	-2.362
	5	$1700 \times 720 \times 12 \times 700 \times 500$	x	-104.990	-105.430	-97.944	-97.979
			y	1.446	-2.060	-2.607	1.814
Container C	6	$1800 \times 840 \times 13 \times 700 \times 500$	x	36.918	36.863	29.183	29.211
			y	-2.079	1.174	1.610	-3.072
	7	$1800 \times 780 \times 11 \times 700 \times 500$	x	43.283	43.218	40.258	40.365
			y	-0.348	0.208	0.935	-1.502

Table 6 Comparison of safety factor between present formula and FEA

Ship Type	Model No.	Applied Stress (MPa)			Critical Buckling Stress (MPa)			Safety Factor				
								Present Formula				FEA
		σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_{xcr}	σ_{ycr}	τ_{cr}	Elastic buckling		Critical buckling		Elastic buckling
								Plate	Stiffened Panel	Plate	Stiffened Panel	
Container A	1	7.5	36.4	68.0	167.2	61.3	113.0	0.93	1.52	0.67	1.07	1.35
	2	3.7	34.8	59.0	167.2	61.3	113.0	0.94	1.60	0.70	1.18	1.42
Container B	3	4.0	3.1	74.5	135.1	42.2	189.2	1.95	2.31	1.15	1.38	1.37
	4	7.4	10.4	103.0	194.5	60.7	189.2	1.48	2.13	0.48	0.97	2.04
	5	30.4	17.6	81.0	135.1	42.2	189.2	1.51	1.95	0.56	1.07	1.83
Container C	6	12.7	26.6	67.3	135.1	42.2	189.2	1.26	1.62	0.64	1.12	1.44
	7	17.0	23.9	33.6	135.1	42.2	189.2	1.42	1.63	0.98	1.46	1.19

이다. 탄성좌굴 안전계수 계산시 식(12)의 임계 좌굴응력(σ_{cr}) 대신 탄성 좌굴응력(σ_E)를 사용하여 구하였다. Fig. 21(b)는 설계식에 의한 유공 판과 유공보강판의 안전계수비를 나타낸 것으로 유공판의 안전계수가 유공보강판 안전계수의 50%~80%정도이다. Fig. 21 (c)는 개발한 설계식과 FEA 의 탄성좌굴 안전계수비로 설계식이 약 10% 정도 상회함을 알 수 있다. 그 이유는 유공 보강판으로부터 식(11)을 사용하여 작용응력을 추출할 때 발생하는 오차 또는 종보강재의 관통을 위한 슬롯홀(Slot Hole)이 유한요소해석에서는 고려하였으나 개발한 설계식에서는 고려하지 않은 차이 등으로 추정된다.

3. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존의 유공판 관련 좌굴강도 평가식을 실선설계에 적용할 때 발생하는 문제점들을 해결하기 위하여 유한요소법으로 수행한 고유치해석에 근거하여 합리적인 탄성 좌굴설계식을 제시하였다. 또한 탄소성 비선형 해석을 수행하여 탄소성 영역에서의 좌굴강도를 정도있게 평가할 수 있게 하기 위하여 새로운 소성수정식을 개발하여 임계 좌굴강도를 구할 수 있게 하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 유공판에 대한 보다 정확한 설계식을 개발하기 위하여 선체구조에서 많이 적용되고 있는 유공판치수를 조사하였으며 이를 바탕으로 유한요소해석을 수행하였다.
- 판부재의 좌굴강도를 평가하는 기존의 설계식들은 경우에 따라서 판의 탄성 좌굴강도를 크게 다르게 평가하고 있어 신뢰성에 문제가 있다는 것을 확인하였다.
- 또한 구멍이 크거나 두꺼운 유공판일 경우 기존 설계식들은 실제의 최종강도 보다 낮게 평가하는 경우가 있어 Johnson-Ostenfeld 소성수정식을 대체하는 새로운 소성수정식을 제시하였다.

- 또한 유공보강판의 경우, 유공판에 인접한 무공판의 면내강성이 강도에 기여하여 유공판보다 강도가 크게 나타남으로 보다 정확한 강도 평가와 합리적 유공판의 사용을 위하여 본 연구에서는 유공보강판에 대한 연구도 수행하였으며 그 결과를 개발한 설계식에 반영하였다.

- 본 연구에서 제안하는 설계식을 비선형 구조해석결과와 비교하였으며 합리적인 결과를 주는 것으로 나타났다.

- 제안하는 설계식은 기존의 유공판 또는 유공보강판의 좌굴강도 설계식들을 대체할 수 있으며 최종강도보다는 다소 보수적 입장에서 평가하는 것으로 나타났다.

- 조합하중을 받는 실선의 유공판과 유공보강판의 좌굴강도를 개발한 설계식으로 평가한 바 FEA 결과와 부합하는 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- DNV, 2008, Rules for Ships, Pt. 3, Ch. 1, Sec. 13 Buckling Control, Det Norske Veritas, Oslo, Norway.
- Harada, M. and Fujikubo, M., 2001, " Estimation of Buckling and Ultimate Strength of Rectangular Plate with Cutout," Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 190, pp. 723-729.
- Harada, M. and Fujikubo, M., 2002, " Estimation of Buckling and Ultimate Strength of Continuous Plate with Cutout under Thrust," Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 192, pp. 367-375.
- IACS, 2006a, Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, International Association of Classification Societies, London, UK.
- IACS, 2006b, Common Structural Rules for Bulk Carriers, International Association of Classification Societies, London, UK.
- ISO, 2007, ISO 18072-1: Ships and Marine

- Technology – Ship Structures – Part 1: General Requirements for Their Limit State Assessment, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2008, ISO/DIS 18072-2: Ships and Marine Technology – Ship Structures – Part 2: Requirements for Their Ultimate Limit State Assessment, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
 - MSC/NASTRAN, 2007, User's Manual, MSC Software, Santa Ana, CA, USA.
 - Kim, U.N., Kim, O.H. and Kim, P.Y., 1998, "A Study on the Buckling Strength of Rectangular Plate with Circular Opening," Proceedings of the Annual Spring Meeting, Society of Naval Architects of Korea, pp. 271-274.
 - Kim, U.N., Choe, I.H. and Kim, O.H., 2005, "Elastic Buckling Strength of Rectangular Plate with Circular Opening under Axial Compressive and Shear Load," The Nineteenth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting (TEAM) Conference, Singapore.
 - Kim, U.N., Choe, I.H. and Paik, J.K., 2008, "On Buckling and Ultimate Strength of Perforated Plate Panels under Axial Compression: Experimental and Numerical Investigations with Design Formulations," 2008 Annual Meeting & Expo, Society of Naval Architects of America and Marine Engineers (SNAME), Houston, Texas, USA.
 - Kim, U.N., Choe, I.H. and Paik J.K., 2009, "Buckling and Ultimate Strength of Perforated Plate Panels under Axial Compressions: Experimental and Numerical Investigations with Design Formulations," Ships and Offshore Structures, Vol. 4, No. 4, pp. 337-361, Taylor and Francis, Oxon, UK.
 - LR, 1978, Lloyd's Register's Plan Appraisal Systems for Ships – Direct Calculation Procedural Document, London, UK.
 - Paik, J.K., Ham, J.H. and Kim, U.N., 1992, "A New Plate Buckling Design Formula," Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol. 171, pp. 559-566.
 - Paik, J.K. and Thayamballi, A.K., 2003, Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
 - Paik, J.K., 2007, "Ultimate Strength of Perforated Steel Plates under Combined Biaxial Compression and Edge Shear Loads," J. of Thin-Walled Structures, Vol. 46, No. 2, pp. 207-213.
 - Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., 1982, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, Singapore.



< 김 은 년 >



< 최 익 흥 >



< 권 진 칠 >



< 백 점 기 >